

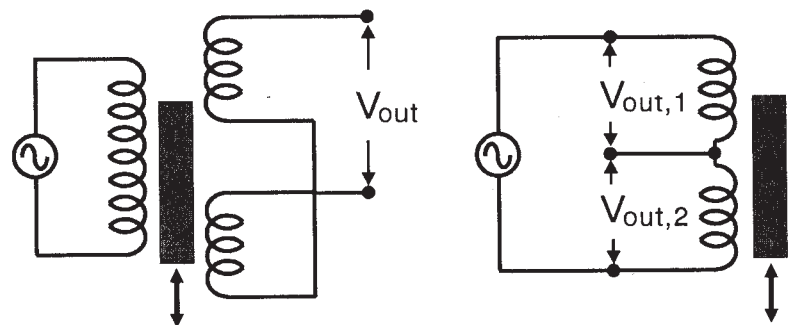
# LVDT センサーを用いた高圧下での ポリマー変位測定技術の修得

第2技術室化学計測技術班 田 畑 功

## 1. はじめに

超臨界二酸化炭素(scCO<sub>2</sub>)は、環境に優しく拡散性に優れた新しい溶剤として、種々の分野での利用が期待されている。例えば、scCO<sub>2</sub> による疎水性ポリマーの可塑化・膨潤を利用して機能材注入などの後処理加工を行うことで、溶剤残留のない高機能ポリマーの製造が可能である。しかしながら、繊維など残留応力を持つポリマーでは、膨潤と同時に残留応力による収縮や結晶化などが起こり、製品の強度や風合いに影響を及ぼす。このため、scCO<sub>2</sub> 雰囲気下でのポリマー変形の情報が重要となるが、高圧下での変形挙動を調べるには、耐圧観察窓付き高压容器などの高価な装置を必要とするのが現状である。

一方、厚さ・長さ・幅など寸法変位を測定する変位センサーには、光、磁界、音波などを利用した非接触方式のものと、ダイヤルゲージや差動トランスなどの接触方式のものがあり、中でも差動トランスは機構が単純で、測定プローブを耐圧容器などで外部と絶縁することで高压雰囲気下での使用も可能である。そこで本研修では、高压仕様の差動トランスを用いて、安価に高压雰囲気下での変位を逐次測定できる変位測定システムの構築を試みた。



(a) Full-Bridge

(b) Half-Bridge

図1 LVDT センサーの模式図

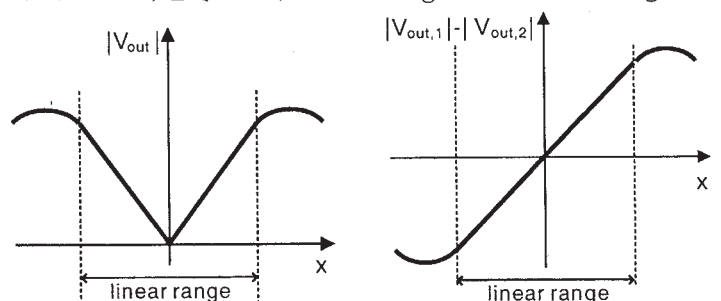
## 2. 変位センサーと専用 IC

### 2. 1 LVDT センサーの原理

リニア変位が測定可能な差動トランスは、LVDT(Linear Variable Differential Transformer)と呼ばれ、Full-Bridge 型と Half-Bridge 型がある(図1)。

測定原理は、図のようにコイルを交流で励磁するとコイルの内外周に交番磁界が発生する。この近傍で磁性体(コア)が移動すると、2つのコイルに対するリアクタンスが変化し、コア位置に比例した出力電圧が得られる(図2)。

本研修では、LVDT センサーとして高压仕様 Half-Bridge LVDT (HPS-03, 新光電機製)



(a) Full-Bridge

(b) Half-Bridge

図2 LVDT の出力電圧特性

を使用した。その仕様を表1に示す。

2. 2 LVDT シグナルコンディショナー

LVDT への励磁交流電圧の供給と信号処理に、LVDT 専用 IC である LVDT シグナルコンディショナー (AD598, Analog Devices 社製)を使用した。図3に Full-Bridge LVDT を連結した場合の AD598 のブロック図を示す<sup>1)</sup>。オンチップ発振器の周波数は外部コンデンサーにより 20Hz~20kHz の範囲で設定でき、二個のフィルターの手前に付いている絶対値回路では A と B チャンネルからの入力の絶対値を検出している。これらの信号はアナログ回路で構成されたレシオメトリック関数  $[A-B]/[A+B]$  で処理され、このレシオメトリック処理により、センサー周囲の温度変化などで一次巻線の励磁電圧が変化した場合も、安定な出力が得られるようになっている。

励磁電圧は外部抵抗により 2.1~24V<sub>rms</sub> の範囲で設定でき、駆動能力は 30mA<sub>rms</sub> である。また、AD598 は位相シフトや信号の絶対値に影響を受けないため、約 90m のケーブルでつながれた LVDT を駆動できる。V<sub>OUT</sub> の位置出力範囲は、±15V 電源を使用した場合 ±11V であり、V<sub>A</sub> と V<sub>B</sub> の入力範囲は 0.1~3.5V<sub>rms</sub> である。

表 1 変位センサー (HPS-03 型) の主な仕様

測定範囲	±10mm(MAX±12mm)
直線性	±3%以内/±10mm ±5%以内/±12mm
励磁	5kHz 5Vrms.正弦波
感度	0.645Vrms.±5%/10mm
耐圧	35MPa
使用温度範囲	-20~120℃
温度安定性	±0.04%/℃ (SPAN ドリフト)

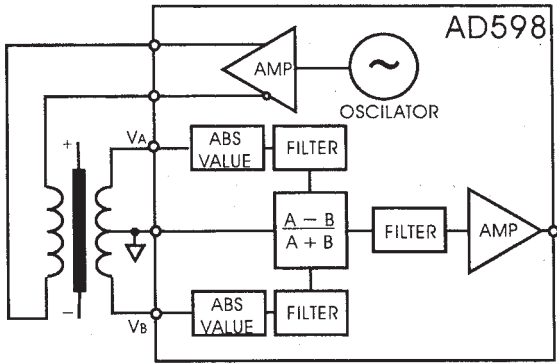


図 3 AD598 のブロック図<sup>1)</sup>

3. 変位測定システムの構築

3. 1 LVDT ドライブ・信号処理回路の製作

製作した LVDT ドライブ・信号処理回路を図4に示す。AD598 の外部素子として使用するコンデンサや抵抗の大きさは、データシートの設計手順に従い、励磁周波数、励磁電圧、変位信号の

バンド幅、DC 出力信号のゲインの大きさを考慮して決定した。

本研修では、LVDT セン

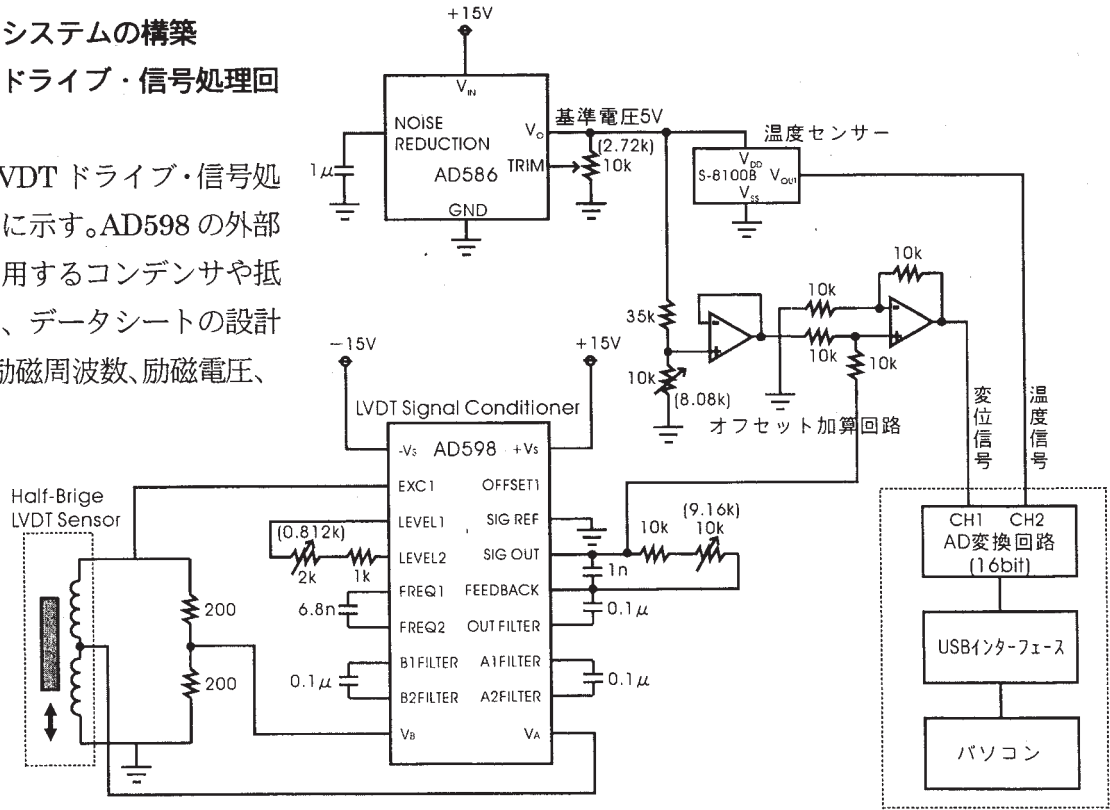


図 4 LVDT ドライブ・信号処理回路

ペンレコーダ方式  
パソコン計測システム

サーの仕様書を基に、励磁周波数 5kHz、励起電圧 5 V rms になるように素子の容量を調整し、また、出力信号のバンド幅は 250Hz 以上とした。この回路の電源には±15V を使用したため、DC 出力信号の電圧値はマイナスからプラスまで変化するが、計測部の A/D 変換器の入力範囲が 0～2.5V であるため、出力信号にオフセット電圧を加えた。AD598 にはオフセット電圧加算機能が内蔵されているが、後述する出力電圧の温度変化の影響を軽減するため、外付けしたオペアンプ加算回路により電圧を加えた。この出力信号を、ペンレコーダ方式パソコン計測システム<sup>2)</sup>(分解能 16bit)を用いてパソコンに取り込み表示させた。この LVDT センサーからの位置信号をパソコンに取り込み逐次表示させるシステムを、以後「変位測定システム」と記す。

### 3. 2 出力信号の温度変化と特殊ノイズへの対応

前述の変位測定システムを使用し、センサーのコア位置を固定した状態で位置信号の安定性を調べた。位置信号は時間の経過とともにドリフトし、その変化量は 24 時間で最大 10mV (80μm に相当) に達した。

この位置信号の時間ドリフトの原因を調べた結果、AD598 上面の放熱面の温度が出力に大きく影響することが分かった。位置信号の低下は夜間生じているため、室温の変化がそのまま AD598 出力電圧の変化につながっていることが予想された。

そこで、基板上に温度センサー(S-8100B)を取り付け、位置信号と温度との関係調べた(図5)。

位置信号の時間変化は温度変化と密接に対応しており、信号ドリフトの原因を確認できた。出力信号の温度係数を計算すると約 600ppm/°C となり、AD598 のゲインとオフセットの温度ドリフトの公称値「50ppm/°C 以内」と比較して大きな温度係数であった。この原因は分からないが、データシートに「Half-Bridge タイプの LVDT センサーを使用した場合 AD598 本来の性能が低下する」という記述があることから、このタイプのセンサーとの相性がよくないためかも知れない。

一方、基板上の温度との相関を利用して温度補償を行うことで温度変化の影響をキャンセルすることが可能である。コア位置を固定した時の位置信号と温度の関係を調べるとリニアな関係が得られるため、位置信号と温度信号の A/D 変換値を基に、ソフト上で位置信号の温度補償を行なった。温度補償のための位置信号デジタル値の補正值  $\Delta D_{Pos}$  の算出に用いた式は以下の通りである。

$$\Delta D_{Pos} = (D_{Temp} - D_{Temp.Init}) \times Gr \times (D_{Pos} - D_{Pos}^0) / (D_{Pos,Calib} - D_{Pos}^0) \quad (1)$$

ここで、 $D_{Temp}$  は温度信号の A/D 変換後の 16bit デジタル値 (以後、D 値と表す)、 $D_{Temp.Init}$  は測定開始時の温度信号の D 値、 $Gr$  は先の位置信号と温度信号のリニア関係の傾き、 $D_{Pos}$  は位置信号 D 値、 $D_{Pos}^0$  はコアゼロ位置での位置信号 D 値 (=  $2^{16}/2$ )、 $D_{Pos,Calib}$  は  $Gr$  算出時の平均位置信号 D 値である。

図5の位置信号にはノイズと思われる約 4mV の針状ピークが2カ所乗っている。繰り返し測定を行った結果、このノイズは基板温度が 30.5°C 前後の時に集中して発生することが分かった。この原因は分からないが、IC と基板格納ボックスの両方を保温することで、夜間でも基板温度がノイズ発生温度である 30.5°C にまで下がらないよう対策を行った。

保温対策を行った後での温度補償を行った場合と行わない場合の位置信号の時間変化の様子を図6

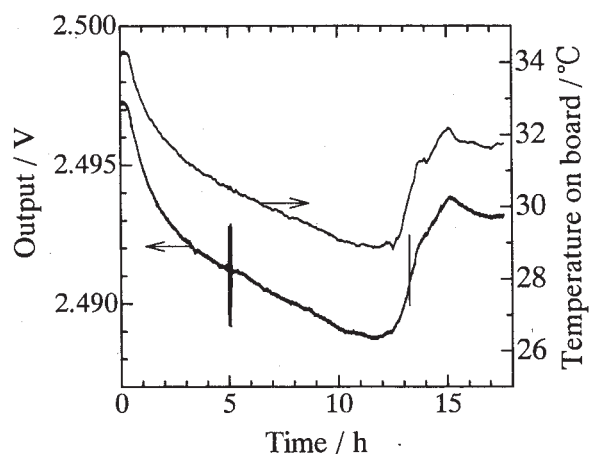


図5 位置信号出力と基板温度の経時変化

に示す。温度補償を行うことで、位置信号は 18 時間で約 1mV しか変動しなくなり、この間の温度変化から算出した補償後の出力信号の温度係数は 73ppm/°C にまで小さくなった。繰り返し実験での 20 時間での位置信号変化は 3mV 以内であり、分解能 25μm の精度で変位検出可能なシステムを構築できた。

### 3. 3 検量線の測定

変位測定システムを使って、コア位置と出力電位との関係を調べた。測定は、コア部と連結した可動軸の先端をマイクロメータヘッド（0～25mm，最小目盛 0.01mm，ミットヨ製）で上下させ、0.5mm 間隔でマイクロメータの読みと LVDT センサーの出力を記録することで行った。出力信号からコア位置を算出する相関式を求めるため、通常の検量線の軸を入れ替え、出力信号に対してコア位置をプロットした（図 7）。プロットは若干弯曲していたため、5 次式で最小二乗を行い次式

$$y = 10.95 - 4.959x - 8.292x^2 + 7.782x^3 - 3.685x^4 + 0.6523x^5 \quad (2)$$

（標準偏差 0.0230）の相関式を得た。

この式の x に出力信号の測定値を代入することでコア位置 y が得られる。この検量式を用いたコア位置の測定誤差は標準偏差の 1.96 倍、±45μm である。

### 4. おわりに

LVDT センサーによる変位測定システムを構築し、パソコンで変位を逐次モニタリングできるようになったが、最終目的である高圧下でのポリマー変位の測定までには至らなかった。これは、LVDT 専用のシグナルコンディショナー IC を用いることで、簡単に LVDT のドライブ・信号処理回路を製作できるという思惑に反し、Half-Bridge タイプのセンサーとの相性が悪く、温度の影響やノイズが発生し、研修の大半を回路の手直しに費やしたためである。また、昨年発表したパソコン計測システムを組み込んだ際に任意の時間で取り込み異常を起こす問題も生じ、その原因解明に手間取ったことも一因した。

### 謝辞

AD598 周辺回路製作に当たり、丁寧にご指導頂いた新光電機（株）の赤松浩司氏に謝意を表します。

### 文献

- 1) Analog Devices, LVDT Signal Conditioner AD598 Data Sheet (Rev.A, C1330-10-10/89)
- 2) 田畑 功, ペンレコーダ方式計測ソフトウェアの試作, 福井大学技術部技術報告集 8, 25(2002)

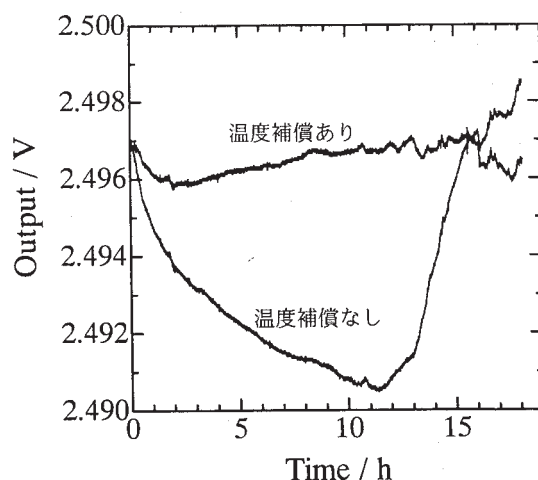


図 6 位置信号の温度補償の効果

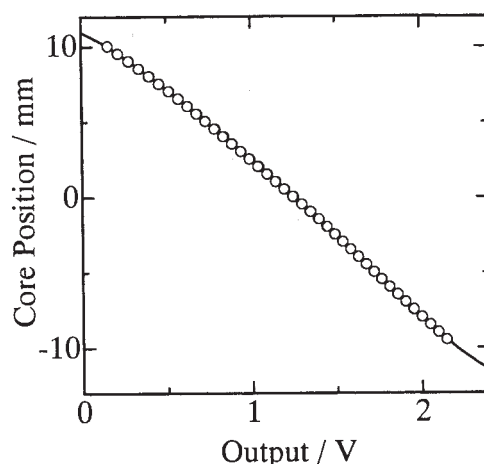


図 7 位置信号とコア位置との関係